

بررسی تأثیر زاویه مخروطی در جذب انرژی در ضربه گیر مخروط شیاردار تحت بارگذاری محوری دینامیکی و مقایسه بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی

نیما اسدی^۱ ده میراحمدی^۱، محمدجواد رضوانی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار گروه مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

* سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۳۱۳۷۱۱۱ rezvani57@gmail.com

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی جذب انرژی در لوله‌های مخروطی شیاردار توخالی آلومینیوم به عنوان سیستم جاذب انرژی تحت بارگذاری دینامیکی می‌باشد. این مدل‌های مخروطی دارای شیارهای مستطیلی هستند. این مقاله به بررسی تعداد شیار و همچنین زاویه مخروطی در جذب انرژی، جذب انرژی ویژه، نیروی بیشینه لهیدگی و راندمان نیروی لهیدگی با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار ال.اس.داینای^۱ پرداخته است. این نوع سیستم جاذب انرژی می‌تواند در صنایع هوایی، کشتی‌سازی، خودروسازی، صنایع ریلی و آسانسورها جهت جذب انرژی ضربه استفاده شود. در انتها پارامترهای هندسی مناسب و بهترین نمونه‌ها از لحاظ معیارهای در نظر گرفته شده با توجه به اهداف طراحی، معرفی می‌شوند.

کلید واژگان

جذب انرژی مخروطی، جذب انرژی ویژه، راندمان نیروی لهیدگی، انرژی جذب شده کل، نیروی متوسط لهیدگی

Numerical investigation of energy absorption semi apical angel in conical grooved tubes under dynamic axial load and comparing quasi-static and dynamic loading

N. Asadi Dehmirahmadi¹, M.J.Rezvani^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2- Research Manager, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

* P.O.B 13513137111 Semnan, rezvani57@gmail.com

Abstract

The purpose of this article is to determine energy absorbing of empty conical tubes. In these innovated models, there are a handful of rectangular grooves around the inner and outer surface of the tube. In this study, effects of number of grooves and their semi apical angel on Energy Absorption, Specific Energy Absorption (SEA), maximum crush load and Crush Force Efficiency (CFE) are considered. The energy absorbing system can be used in the aerospace industry, shipbuilding, automotive, railway industry and elevators used to absorb impact energy. Finally, appropriate geometric parameters and the best examples of criteria considered with respect to the objectives, are introduced.

Keywords

Specific Energy Absorption, Crush Force Efficiency, energy absorbing bumpers, Total energy absorbed, average energy absorbed.

۱- مقدمه

در سال ۱۹۹۱ مملیس و همکاران [۴] لهیدگی محوری لوله‌های جدار نازک به عنوان سیستم‌های جذب انرژی را از طریق تئوری و آزمایشگاهی با در نظر گرفتن دو جنس ماده‌ی مختلف برای آن‌ها در نظر گرفتند. گوپتا [۵] در ۱۹۹۳ با در نظر گرفتن دو جنس مختلف برای لوله‌های استوانه‌ای و نسبت‌های متغیر طول به قطر و قطر به ضخامت و فرآیند آنیل کردن، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر این پارامترها در رفتار لهیدگی لوله‌ها پرداخته‌اند. مملیس و همکاران [۶] به مدلسازی لهیدگی محوری لوله‌های جدار نازک فولادی شیاردار، با متغیر در نظر گرفتن تعداد شیار خارجی، پرداخته‌اند. حسینی‌پور و دانشی [۷، ۸، ۹] در سال ۲۰۰۳ به بررسی‌های آزمایشگاهی جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی در لوله‌های شیاردار جدار نازک تحت فشار محوری پرداخته‌اند و هدف را بهبود یکنواختی رفتار نیرو - جابجایی و پیش‌بینی قابلیت جذب انرژی بیان کرده‌اند. صالح غفاری و همکاران [۱۰] در ۲۰۱۱ به تحلیل جاذب‌های رینگ‌دار پرداختند.

سیستم‌های جذب انرژی ضربه به دلیل حداقل کردن اثر ضربه وارده به سرنشینان و بالا بردن ایمنی در سوانح رانندگی و برخورد خودروها با موانع، در صنایع مختلف مانند کشتی‌سازی، راه‌آهن، صنایع هوایی و به ویژه در صنایع خودروسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. به این منظور سیستم‌های گوناگون جذب انرژی به کار گرفته شده‌اند که از این میان لوله‌های جدار نازک به خاطر سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا و نسبت جذب انرژی به وزن بالا و در نتیجه هزینه ساخت پایین به عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های جذب انرژی کاربرد روز افزونی پیدا کرده‌اند. اندروز و همکارانش [۱] در سال ۱۹۸۳ نتایج یک بررسی آزمایشگاهی از موده‌های لهیدگی محوری و خواص جذب انرژی در حالت شبه استاتیکی برای لوله‌های آلومینیومی را بیان کرده‌اند. در سال ۱۹۸۶ مملیس و همکاران [۲] به بررسی آزمایشگاهی لهیدگی محوری لوله‌های فولادی جدار نازک رینگ‌دار پرداخته‌اند. مملیس و همکاران [۳] در سال ۱۹۸۹ به بررسی جذب انرژی و تغییر شکل لوله‌های جدار نازک با دو روش تئوری و آزمایشگاهی پرداخته‌اند.

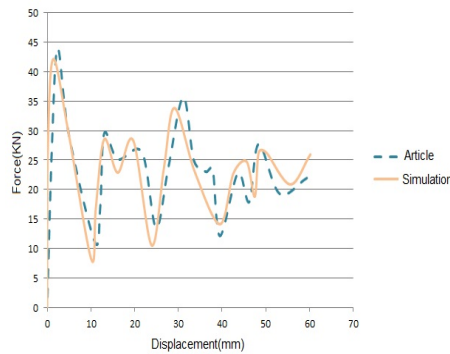
¹ LS DYNA

۲- بیان موضوع

شکل (۱-۲) مشخص است شکل لهیدگی با نمونه عملی مشابه است و نمودار نیرو - جابجایی حدود ۳٪ خطا دارد که قابل چشم پوشی است. همانطور که در شکل (۱-۲) مشخص است قطعه بصورت نامتقارن له شد که حالتی تامطلوب برای طراحی جاذب‌های انرژی می‌باشد به همین دلیل شرایط برخورد بصورت دینامیکی در نظر گرفته شد که مشخص شود شکل لهیدگی بهبود میابد یا خیر.



الف



ب

شکل ۲ اعتبارسنجی شبیه سازی عددی با نمونه تجربی: الف) شکل لهیدگی، ب) نمودار نیرو - جابجایی

۵- شبیه سازی عددی

۱-۵- پارامترهای هندسی

در شکل ۳ پارامترهای هندسی لوله مخروط شیاردار نشان داده شده است. در این تحقیق متغیرهای طراحی شامل تعداد و عمق شیارها می باشند. تعداد شیارها ۹، ۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۷ و زاویه مخروطی در مدل‌های شبیه‌سازی شده سری اول ۶ درجه و در مدل‌های شبیه‌سازی شده سری دوم ۴ درجه در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، ثوابت طراحی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ مقادیر ثوابت طراحی

مقدار	واحد	پارامتر
۱۱۷	mm	طول
۳	mm	عرض شیار
۱	mm	عمق شیار
۲	mm	ضخامت دیواره
۵۸	mm	قطر بزرگ

تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی جذب انرژی ضربه، نشان می‌دهد که نحوه لهیدگی در اثر ضربه و میزان انرژی جذب شده در لوله‌های جدار نازک می‌تواند با ایجاد الگوهای مختلف بر روی لوله کنترل شود و سبب بالا بردن میزان کارایی این نوع از جاذب‌ها گردد. به دلیل اثرات متقابل این پارامترها بر روی هم با انتخاب تعداد پارامترهای بیشتر نتایج بهتری حاصل می‌شود که این مسئله باید در نظر گرفته شود. بنابراین جهت بهبود طراحی این لوله‌ها، در این تحقیق به مقایسه پارامترهای ضربه‌پذیری با بررسی برخی پارامترهای هندسی مربوط به لوله‌های مخروطی، پرداخته شده است. همچنین برای مدلسازی نمونه‌های مورد نیاز از نرم افزار ال.اس.دایناس استفاده شده است.

۳- شاخص‌های طراحی جاذب انرژی

شاخص‌های مهمی در مورد جاذب‌های انرژی وجود دارند که مهمترین آنها جذب انرژی، ماکزیمم نیروی لهیدگی و راندمان نیروی لهیدگی هستند. هدف کلی از این تحقیق، یافتن بهترین نمونه از نمونه‌های مورد بررسی قرار گرفته شده بر اساس جذب انرژی و ماکزیمم نیروی لهیدگی می‌باشد.

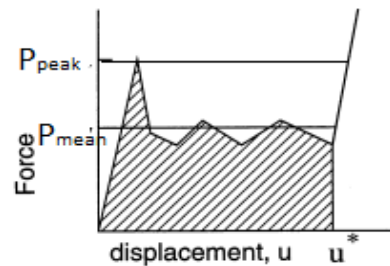
۱-۳- جذب انرژی

جذب انرژی، $E_{absorbed}$ به عنوان انتگرال منحنی نیرو-جابجایی به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$E_{absorbed} = \int Pd\delta \quad (1)$$

۲-۳- ماکزیمم نیروی لهیدگی

مطابق شکل ۱ نیروی ماکزیمم لهیدگی در تشکیل اولین چین نقش دارد. حداکثر نیرو در جاذب‌های جدار نازک مربوط به تغییر شکل الاستیک است که بعد از آغاز تغییر شکل پلاستیک به سرعت کاهش می‌یابد. تمهیدات زیادی برای کاهش این نیرو ارائه گردیده است.



شکل ۱ نیروی ماکزیمم لهیدگی

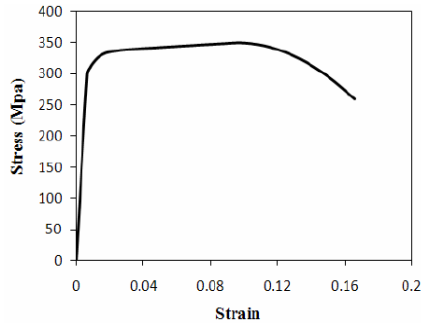
۳-۳- راندمان نیروی لهیدگی

راندمان نیروی لهیدگی، به صورت نسبت نیروی متوسط لهیدگی تقسیم بر ماکزیمم نیروی لهیدگی تعریف می‌گردد.

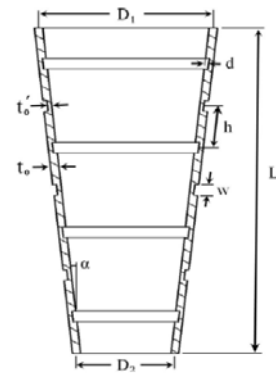
$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (2)$$

۴- اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از روش مدلسازی، مدل ۱۷ شیاره مرجع [۳۰] به روش شبه استاتیکی با نرم افزار ال.اس.دایناس مدلسازی شد که همانطور که در



شکل ۵ نمودار تنش - کرنش برای آلومینیوم 6061-T6



شکل ۳ جاذب مخروطی شیاردار

۴-۵- تعیین اتصالات و تشخیص برخوردها

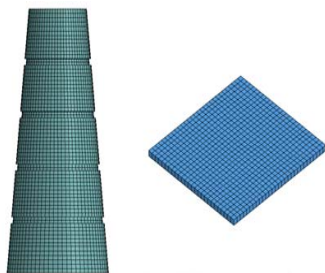
برای تعریف تماس بین صفحات صلب با لوله ها با یکدیگر از تماس "انوماتیک نود به سطح"^۱ استفاده می شود. از آنجا که در زمان فروریزش نمونه ها، المان های دیواره لوله با یکدیگر تماس پیدا می کنند از تماس "انوماتیک سطح منفرد"^۲ استفاده شده است تا از نفوذ المان ها به داخل یکدیگر جلوگیری شود. اصطکاک یکی از مهمترین مشخصه هایی است که در فرآیند شبیه سازی باید مشخص گردد. در شبیه سازی برای اعمال اصطکاک بین اجزا مدل از اصطکاک استاتیکی با ضریب ۰/۲ و اصطکاک دینامیکی با ضریب ۰/۳ استفاده شده است.

۵-۵- بارگذاری و ایجاد شرایط مرزی

شرایط مرزی شبیه سازی به صورت زیر می باشد: ۱- سطح زیر سازه در تمام جهات محدود شده است. ۲- صفحه برخورد کننده در بالای سازه در تمام جهات به جز در جهت عمودی محدود شده است.

۶-۵- مش بندی

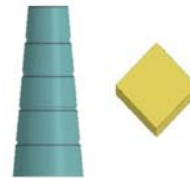
شکل ۶ مش بندی قطعات نشان داده شده است. جهت همگرایی مش و رسیدن به اندازه ی مش مناسب که برای تمامی نمونه ها بکار برده شود، سایزهای مختلف مش برای یک نمونه در نظر گرفته شده و نیروی ماکزیمم لهیدگی هر سایز مش برای لوله ی مخروطی بررسی گردید. مقادیر ماکزیمم نیروی لهیدگی در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، اندازه مش ۲ mm می تواند نتایج دقیقی را ایجاد کند.



شکل ۶ مش بندی قطعات

۲-۵- مراحل شبیه سازی توسط LS DYNA /Implicit

در این مقاله، مدل مورد نظر، شامل دو سری می باشد. سری اول تشکیل شده یک لوله جدار نازک مخروطی با عمق شیار ۱ میلی متر و سری دوم نیز شامل یک لوله جدار نازک مخروطی با عمق شیار ۰/۵ میلی متر می باشد.



شکل ۴ مدل سازی قطعات

۳-۵- خواص مواد لوله ی مخروطی

پذیرش مواد سبک وزن با حفظ جذب انرژی برای کاهش وزن انگیزه ی قابل توجهی است. آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم و کامپوزیت ها همه به عنوان جایگزینی برای فولاد نرم در سازه هواپیما یا بالگرد و یا خودرو پیشنهاد شده اند. بنابراین نمونه های این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 می باشد. خواص این ماده در جدول ۲ داده شده است [۱۲].

جدول ۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی برای لوله آلومینیومی

آلومینیوم 6061-T6		
ضریب پواسون	-	۰/۳۳
چگالی	Kg/m3	۲۷۰۰
مدول یانگ	GPa	۷۰
تنش تسلیم	MPa	۳۱۱
استحکام نهایی	MPa	۳۴۹

برای بدست آوردن اطلاعات دقیق مواد، از منحنی تنش - کرنش آلومینیوم 6061-T6 مطابق شکل ۵ استفاده شده است [۱۲].

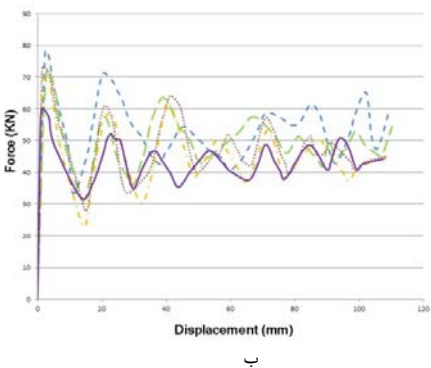
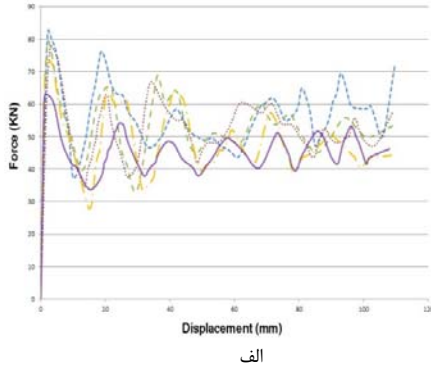
¹ AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE

² AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE

جدول ۳ نیروی بیشینه لهیدگی برای سایزهای مختلف مش

لوله مخروطی	
نیروی بیشینه لهیدگی (KN)	سایز مش (mm)
۱۱۰/۸۵۵	۳/۰
۱۰۳/۸۲۷	۲/۷۵
۹۸/۳۱۳	۲/۵۰
۹۷/۶۲۰	۲/۲۵
۹۶/۸۳۰	۲/۰
۹۶/۵۴۶	۱/۸۰
۹۶/۱۸۷	۱/۶۰

با توجه به شکل ۷، در ماکزیمم نیروی لهیدگی، ماده در انتهای باریک لوله تسلیم شده و با ایجاد اولین لولا پلاستیک نیرو به شدت کاهش می‌یابد. کاهش نیرو تا زمانی که یک چین به صورت کامل شکل بگیرد ادامه پیدا می‌کند. سپس لولای بعدی شکل گرفته و مجدداً کاهش و افزایش نیرو در منحنی دیده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که هر یک از قله‌های ایجاد شده در منحنی نیرو-جابجایی معرف تشکیل یک چین است. البته در تعداد شیارهای کم یک سری ناپایداریهایی در منحنی دیده می‌شود که برای نمونه‌های با تعداد شیار بالا (۱۷ شیار) به صورت پایدار و یکنواخت می‌باشد. اگر چه با وجود شیار میزان جذب انرژی کاهش یافته، ولی باعث ایجاد ولی باعث ایجاد لولاهای پلاستیک یکنواخت در طول فرآیند لهیدگی لوله می‌شود.



شکل ۷ نمودار نیرو - جابجایی: الف) با زاویه مخروطی ۶ درجه، ب) با زاویه مخروطی ۴ درجه

۱-۶- بررسی تعداد و اثر شیار روی جذب انرژی

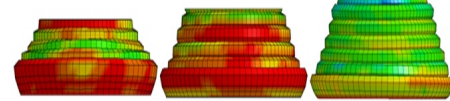
شکل ۸ نمودار جذب انرژی نمونه‌های شبیه سازی شده برای نمونه‌های با زاویه مخروطی ۶ درجه و ۴ درجه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد شیار میزان جذب انرژی کاهش یافته و این میزان کاهش جذب انرژی برای نمونه‌های با زاویه مخروطی ۴ درجه بیشتر است. لذا می‌توان با انتخاب تعداد شیار و زاویه مخروطی مناسب بیشترین جذب انرژی را در لوله‌های مخروطی شیاردار تحت بار دینامیکی ایجاد کرد. نمونه‌های با تعداد شیار ۹ دارای بیشترین جذب انرژی و نمونه‌های با شیار ۱۷ کمترین جذب انرژی را دارند.

۵-۷- شرایط مسئله

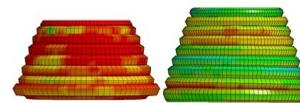
در مدلسازی نمونه‌ها، سرعت و جرم برخورد به ترتیب ۲۰ متر بر ثانیه و ۶۰ کیلوگرم هستند همچنین زمان برخورد ۵ میلی ثانیه می‌باشد.

۶- بحث و بررسی

شکل ۶ فروریزش نمونه‌های شبیه سازی شده تحت بارگذاری دینامیکی برای مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است همه نمونه‌ها دارای فروریزشی متقارن بوده و تعداد و عمق شیارها تأثیری در فروریزش نمونه‌های مخروطی ندارند. بعد از یک تغییر شکل الاستیک اولیه، اولین لولای پلاستیک در شیار که معمولاً نزدیک به یک انتهای لوله است شکل می‌گیرد. سپس لولاهای پلاستیک در شیارهای داخلی به سمت خارج لوله حرکت می‌کنند و لولاهای پلاستیک مربوط به شیارهای خارجی به سمت داخل سوق داده می‌شوند. این امر منجر به تشکیل چین‌ها به صورت متقارن می‌شود.

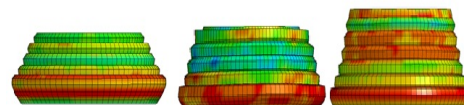


F9-6 F11-6 F13-6

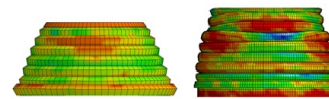


F15-6 F17-6

الف



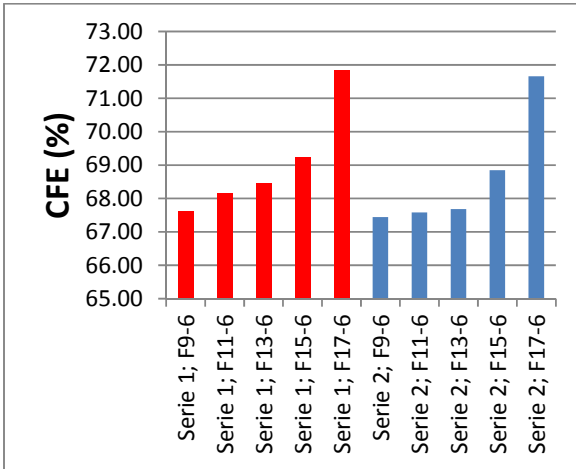
F9-6 F11-6 F13-6



F15-6 F17-6

ب

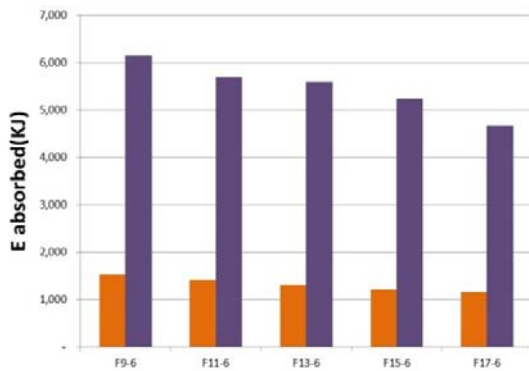
شکل ۶ فروریزش نمونه‌های مخروطی شیاردار: الف) با زاویه مخروطی ۴ درجه، ب) با زاویه مخروطی ۶ درجه



شکل ۶-۱۰ راندمان نیروی لهیدگی نمونه های شبیه سازی شده برای نمونه های با زاویه مخروطی ۶ درجه و ۴ درجه

۴-۶- مقایسه نتایج شبیه سازی دینامیکی با شبه استاتیکی

همانطور که از شکل ۶ مشخص است شبیه سازی دینامیکی شکل لهیدگی را بهبود می بخشد زیرا جاذبها بصورت متقارن له می شوند. همچنین همانطور که انتظار می رفت به دلیل بیشتر بودن سرعت برخورد، جاذبها در حالت دینامیکی انرژی بیشتری جذب می کنند. شکل ۱۱ مقایسه جذب انرژی در حالت دینامیکی و شبه استاتیکی را نشان می دهد.



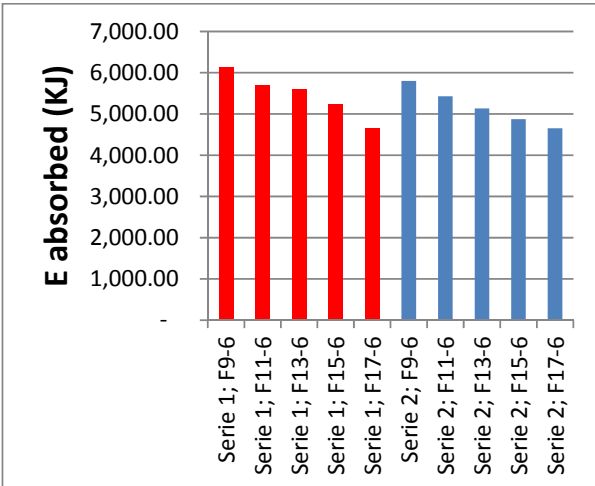
شکل ۱۱ جذب انرژی در حالت دینامیکی و شبه استاتیکی

۷- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، بررسی ضربه پذیری جاذب مخروطی جدار نازک شیاردار تحت بارگذاری دینامیکی بوده است. لذا با استفاده از شبیه سازی عددی توسط نرم افزار ال.اس.داینما میزان جذب انرژی، نیروی ماکزیمم لهیدگی و راندمان نیروی لهیدگی شاخص راندمان نیروی لهیدگی به عنوان اهداف طراحی بدست آمدند. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نشان داد که در حالت بارگذاری دینامیکی تعداد شیار تأثیری در نحوه فروریزش لوله مخروط شیاردار ندارد. بنابراین با انتخاب صحیح تعداد شیار و زاویه مخروطی می توان باعث بهبود معیارهای ضربه پذیری لوله های مخروطی شیاردار گردید.

۸- مراجع

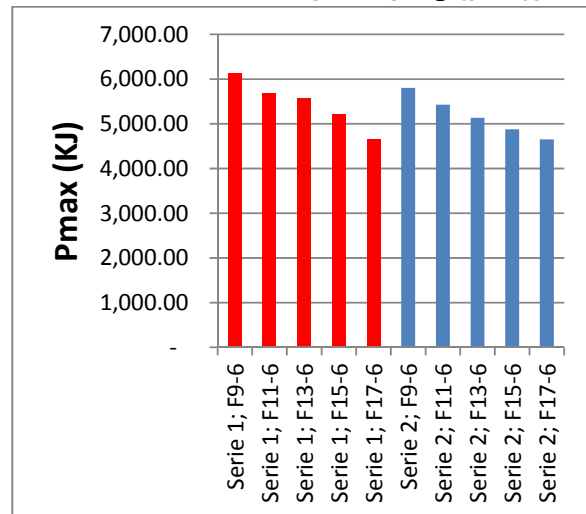
- [1] Andrews, K.R.F., G.L. England, and E. Ghani, *Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading.*



شکل ۸ جذب انرژی نمونه های شبیه سازی شده برای نمونه های با زاویه مخروطی ۶ درجه و ۴ درجه

۶-۲- بررسی تعداد و اثر شیار روی نیروی ماکزیمم لهیدگی

شکل ۹ نمودار نیروی ماکزیمم لهیدگی نمونه های شبیه سازی شده برای لوله های مخروط با زاویه مخروطی ۶ درجه و ۴ درجه را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش تعداد شیار مقدار نیروی ماکزیمم لهیدگی کاهش یافته و این میزان کاهش نیروی ماکزیمم لهیدگی برای نمونه های با زاویه مخروطی ۴ درجه بیشتر است.



شکل ۹ ماکزیمم نیروی لهیدگی نمونه های شبیه سازی شده برای نمونه های با زاویه مخروطی ۶ درجه و ۴ درجه

۶-۳- بررسی تعداد و اثر شیار روی راندمان نیروی لهیدگی

شکل ۱۰ نمودار راندمان نیروی لهیدگی نمونه های شبیه سازی شده برای لوله های مخروط با زاویه مخروطی ۶ درجه و ۴ درجه را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش تعداد شیار مقدار راندمان نیروی لهیدگی افزایش یافته که این میزان افزایش برای نمونه های با زاویه مخروطی ۶ درجه بیشتر است.

- International Journal of Mechanical Sciences. 25(9): p. 687-696, 1983.
- [2] Mamalis, A.G., G.L. Viegelah, D.E. Manolacos, and W. Johnson, *Experimental investigation into the axial plastic collapse of steel thin-walled grooved tubes*. International journal of impact engineering. 4(2): p. 117-126, 1986.
- [3] Mamalis, A.G., D.E. Manolacos, G.L. Viegelah, and W. Johnson, *Energy absorption and deformation modes of thin PVC tubes internally grooved when subjected to axial plastic collapse*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 203(1): p. 1-8, 1989.
- [4] Mamalis, A.G., D.E. Manolacos, G.A. Demosthenous, and W. Johnson, *Axial plastic collapse of thin bi-material tubes as energy dissipating systems*.
- [5] Mamalis, A.G., G.L. Viegelah, D.E. Manolacos, and W. Johnson, *Experimental investigation into the axial plastic collapse of steel thin-walled grooved tubes*. International journal of impact engineering. 4(2): p. 117-126, 1986
- [6] Mamalis, A.G., D.E. Manolacos, M.B. Ioannidis, P.K. Kostazos, and S.N. Kastanias, *Numerical modelling of the axial plastic collapse of externally grooved steel thinwalled tubes*. International Journal of Crashworthiness. 8(6): p. 583-590, 2003.
- [7] Daneshi, G.H. and S.J. Hosseini-pour, *Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression*. Materials & design. 23(7): p. 611-617, 2002.
- [8] Hosseini-pour, S.J. and G.H. Daneshi, *Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression*. Thin-Walled Structures. 41(1): p. 31-46, 2003.
- [9] Hosseini-pour, S.J. and G.H. Daneshi, *Experimental studies on thin-walled grooved tubes under axial compression*. Experimental mechanics. 44(1): p. 101-108, 2004
- [10] Salehghaffari, S., M. Rais-Rohani, and A. Najafi, *Analysis and optimization of externally stiffened crush tubes*. Thin-walled structures. 49(3): p. 397-408, 2011
- [11] Rezvani, M.J., M.D. Nouri, and H. Rahmani, *Experimental and numerical investigation of grooves shape on the energy absorption of 6061-T6 aluminium tubes under axial compression*. International Journal of Materials and Structural Integrity. 6(2): p. 151-168, 2012.
- [12] Rezvani, M.J., M.D. Nouri, *Axial Crumpling of Aluminum Frusta Tubes with Induced Axisymmetric Folding Patterns*, International Journal of Materials and Structural Integrity. 6(2): p. 151-168, 2012